

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Porovnání profilových a plošných parametrů
povrchu materiálu vytvořeného technologií
frézování**

**Comparison of Profile and Areal Parameters of
Surface Material Created by Milling Technology**

Student:

Lukáš Michna

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Michna**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Porovnání profilových a plošných parametrů povrchu materiálu
vytvořeného technologií frézování
Comparison of Profile and Areal Parameters of Surface Material Created
by Milling Technology

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současného stavu.
2. Termíny a definice podle normy.
3. Analýza metod měření.
4. Experimentální část.
5. Zhodnocení výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie, část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 104 s. ISBN 80-248-0671-1.
[2] PERNIKÁŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno : VUT v Brně, 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.

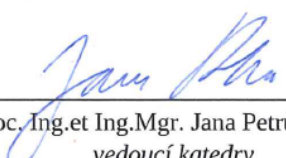
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Dagmar Klichová

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 15. května 2017



Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 15. května 2017



.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Lukáš Michna

Adresa trvalého pobytu autora práce: Polichno 110, 763 41 Biskupice u Luhačovic

ANOTACE BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MICHNA, L. *Porovnání profilových a plošných parametrů povrchu materiálu vytvoření technologií frézování: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 49 s. Vedoucí práce: Čepová, L., konzultant práce: Klichová, D.

Bakalářská práce je zaměřena na porovnání profilových a plošných parametrů povrchu materiálu vytvořeného technologií frézování. Úvodní část bakalářské práce se věnuje shrnutí současného stavu v problematice měření a vyhodnocení povrchu. V předkládané práci je popsána technologie frézování a její vliv na výslednou kvalitu povrchu. Jsou zde uvedeny kontaktní a bezkontaktní metody měření topografie povrchu. Dále jsou v práci popsány termíny a definice profilových a plošných parametrů dle platných norem. V experimentální části jsou vyhodnoceny profilové a plošné parametry drsnosti, které jsou následně porovnány. Analýza povrchu pomocí plošných parametrů představuje významný pokrok v hodnocení zkoumané textury povrchu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MICHNA, L. *Comparison of profile and areal parameters of surface material created by milling technology: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2017, 49 p. Thesis head: Čepová, L., consultant: Klichová, D.

Bachelor's thesis compares profile and surface roughness parameters of material, manufactured by milling. Preface of this thesis contains a description of the current state of metrology and surface measurement. Theoretical part of the thesis describes milling technology and its influence on final quality of surface. In addition, contact and non contact topography measurement methods, terms and definitions of profile and surface parameters are described according to valid standards. Practical part contains evaluation and comparison of profile and surface roughness parameters. Surface analysis, based on surface parameters, presents significant progress in surface texture evaluation.

Obsah

Úvod.....	9
1. Přehled současného stavu	10
2. Technologie frézování	11
2.1 GEOMETRIE BŘITU FRÉZY	15
2.2 ZÁKLADNÍ ÚHLY NA ZUBU NÁSTROJE	15
3 Metody měření topografie povrchu	17
3.1 MĚŘENÍ S DOTYKOVÝMI PŘÍSTROJI	17
3.2 BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ.....	19
3.2.1 Optický profilometr MicroProf FRT.....	19
4 Způsoby vyhodnocování	21
4.1 PROFILOVÉ PARAMETRY.....	21
4.1.1 Geometrické parametry dle ČSN EN ISO 4287.....	22
4.1.2 Filtrování a proložení povrchu	24
4.1.3 Sledované profilové parametry dle normy ČSN EN ISO 4287	25
4.2 PLOŠNÉ PARAMETRY POVRCHU	28
4.2.1 Filtrování.....	28
4.2.2 Sledované parametry	29
5 Experimentální část.....	31
5.1 POPIS VZORKU	31
5.2 MĚŘENÍ ZA POMOCÍ PROFILOMETRU MICROPROF FRT.....	32
5.3 VYHODNOCENÍ PROFILU POVRCHU	33
5.4 VYHODNOCENÍ PLOCHY POVRCHU.....	36
5.5 POROVNÁNÍ PROFILOVÝCH A PLOŠNÝCH PARAMETRŮ	40
6 Závěr	43
7 Seznam použitých zdrojů.....	44
8 Seznam obrázků	47
9 Seznam tabulek.....	48
10 Seznam příloh	49

Seznam použitého značení a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
$C1, C2$	[μm]	hladiny řezu
D	[mm]	průměr nástroje
F	[N]	přítlačná síla
Q	[$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]	velikost úběru materiálu
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rp	[μm]	největší výška výstupku profilu drsnosti
RSm	[mm]	průměrná šířka prvků profilu drsnosti
Rt	[μm]	celková výška profilu drsnosti
Rv	[μm]	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
Rz	[μm]	největší výška profilu drsnosti
Sa	[μm]	aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
Sp	[μm]	maximální výška piku omezené stupnice povrchu
Sv	[μm]	maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu
Sz	[μm]	maximální výška omezené stupnice povrchu
V	[mm^3]	objem
Xs	[μm]	šířka prvku profilu drsnosti
$Z(x)$	[μm]	výšková souřadnice v závislosti na poloze x
a_e	[mm]	šířka záběru
a_p	[mm]	hloubka záběru
f_z	[mm]	posuv na zub
ln	[mm]	vyhodnocená délka pro profil drsnosti
lp	[mm]	základní délka pro primární profil
lr	[mm]	základní délka pro profil drsnosti
lw	[mm]	základní délka pro profil vlnitosti
n	[min^{-1}]	počet otáček vřetene
$s(x)$	[μm]	výběrová směrodatná odchylka
v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	řezná rychlost
v_f	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	posuvová rychlost
\bar{x}	[-]	výběrový průměr
x, y, z	[mm]	osy souřadného systému pro měření povrchu

Symbol	Jednotka	Popis
z	[-]	počet zubů nástroje
α	[°]	úhel hřbetu nástroje
β	[°]	úhel břitu nástroje
γ	[°]	úhel čela nástroje
λ_s	[°]	úhel sklonu ostří
λ	[nm]	vlnová délka
λ_c (λ cut-off)	[mm]	mezní vlnová délka
λ_f	[mm]	vlnová délka dlouhovlnného filtru profilu
λ_s	[μm]	vlnová délka krátkovlnného filtru profilu

Úvod

Rok od roku jsou kladeny větší nároky na kvalitu obráběných ploch a taky jejímu vyhodnocování. Jakost povrchu můžeme chápat jako přesnost geometrických tvarů, plochy a drsnosti povrchu nebo přesnosti rozměrů. Kvalita povrchu je důležitá na chodu strojních součástí. Případné nepřesnosti by mohli vyvolat házení, hlučnost, ztráty tření, menší pevnost, odolnost vůči korozi, odolnost proti opotřebení, aj. K zamezení vzniku již uvedených příčin můžeme přesně vyhodnotit povrch a to měřením dotykovou nebo bezdotykovou metodou.

Pro kvantitativní hodnocení topografie povrchu jsou dnes běžně využívány profilové parametry, které nám definuje norma ČSN EN ISO 4287 [1].

V současnosti je trendem pro hodnocení kvality povrchu využívání plošných parametrů, které nám definuje norma ČSN EN ISO 25178-2 [2]. Analýza povrchu pomocí plošných parametrů představuje významný pokrok v hodnocení zkoumané textury povrchu.

Bakalářská práce je zaměřena na porovnání profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu, vzniklé řezným nástrojem, a to technologií frézování. Cílem práce je vyhodnotit povrchy tří vzorků etalonu z frézovací vzorkovnice z pohledu kvantitativního hodnocení kvality povrchu. Fréza odebírající materiál zanechává periodický povrch, na kterém jde vidět dráha nástroje. Pro experimentální část byla použita bezkontaktní měřicí metoda. Měření bylo provedeno pomocí optického profilometru MicroProf FRT.

1. Přehled současného stavu

Pokrok ve vývoji měřících zařízení a způsobů vyhodnocení kvality povrchu jde jako u jiných oborů výrazně nahoru. V poslední době se kladou vyšší nároky na strukturu funkčních ploch, rychlost a přesnost vyhodnocení kvality povrchu. Vývoj měřící techniky a vyhodnocování struktury povrchu zaznamenaly v minulých letech velký pokrok. Výrobci měřících zařízení reagovali na větší požadavky na kvalitu povrchů, která je spojena s vysokou přesností rozměrů. Vývoj zařízení pro měření je výrazně ovlivněn i technickými potřebami uživatelů a jejich ekonomickému rozpočtu. Dříve se měřily profily povrchu pouze dotykovými zařízeními. Dnes jsou více využívána bezdotyková zařízení. Jsou vhodné pro plošné hodnocení povrchu, i když snímání dat je složitější. [3]

Optický profilometr od společnosti Zygo je způsobilý měřit prakticky jakýkoliv povrch. Jejich přístroje umožní uživatelům měřit jakékoliv povrchy. Tímto se nám naskytuje možnost měření s použitím jednoho přístroje, jak pro vysoce leštěné povrchy, tak pro povrchy s prudkým stoupáním (až 85 stupňů). Česká firma IMECO TH, jež zastupuje mezinárodní firmy jako Taylor Hobson, Microrep, Eley Metrology a Altimet je výhradním zástupcem firmy Taylor Hobson. Mezi mezinárodní lídry patří Mitutoyo nebo UZIMEX AG. Jedním ze zařízení společnosti Taylor Hobson je i LuphoScan 260 HD (Obr. 1) sloužící pro plošné měření nejkvalitnějších optických ploch. S pomocí zařízení těchto společností jsou umožněny měření drsnosti povrchu jak profilovou metodu tak i plošnou. Vyhodnocení plošných parametrů drsnosti vychází z koncepce standardů profilových parametrů drsnosti povrchu, která řeší zejména praktické problémy. Přístroje od výrobce T. Hobson nám umožní měření v oboru profilu povrchu, úchylek tvaru a polohy a měření délek. [4], [5]



Obr. 1 3D profilometr LuphoScan 260 HD [5]

2. Technologie frézování

Frézování je operace třískového obrábění, při kterém dochází k úběru materiálu z obrobku ve formě drobných třísek rotační vícezubou frézou. Fréza se otáčí kolem své osy a svými zuby na nástroji postupně odebírají materiál ve tvaru třísky, které jsou krátké nestejně tloušťky, takže proces je přerušovaný. Posuv nejčastěji koná obrobek, ve směru kolmém k ose nástroje. Moderní stroje poskytují plynulé pohyby a mohou být ve všech směrech. [6]

Touto technologií s použitím různých druhů nástrojů, lze obrábět plochy rovinné, tvarové, šikmé, rotační, nebo nepravidelné. Frézování velkými řeznými rychlostmi umožňuje produktivnější a hospodárnější odebírání materiálu než při obrábění jednobřitými nástroji jako je například: hoblování, nebo obrážení. Frézováním docílíme i u složitých případů výsledku a to není možné jinou technologií [6].

Přesnost rozměrů a jakost obrobenej plochy viz Tab. 1 je při frézování ovlivněna mnoha parametry řezného procesu:

- velikosti posuvu,
- řezné rychlosti,
- geometrie břitu nástroje (jeho úhly),
- houževnatost materiálu,
- mazání.

Tab. 1 Způsoby obrábění a jejich drsnosti [8]

Způsob obrábění	Ra [μm]
Hrubování	> 6,3
Obrábění načisto	1,6 - 6,3
Jemné obrábění	0,2 - 1,6
Speciální dokončovací obrábění	< 0,2

Pohyby nástroje:

Hlavní pohyb – vykonává frézka je rotační.

Vedlejší (posuvový) pohyb – vykonává obrobek, který je upnutý na pracovním stole a pohyb je většinou přímočarý (u okružním a planetovém frézování může být i rotační).

Řezné podmínky:

Podmínky jsou závislé na vlastnostech nástroje, troje, obrobku i prostředí a na požadovaných parametrech frézovaných ploch obrobku, a proto je žádoucí se řídit doporučenými informacemi výrobce nástrojů.

- **Řezná rychlost** – pro technologii frézování se pohybuje v rozsahu 20 až 570 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a závisí na druhu obráběného materiálu, druhu nástrojového materiálu a na způsobu frézování. V pásnu vytváření třísky se hromadí materiál a vytvářejí se nárůstky na čele a způsobuje nerovnosti. Hodnota řezné rychlosti se vypočítá podle vztahu [7], [8]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

kde: v_c - řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],

D - průměr nástroje [mm],

n - počet otáček vřetene [min^{-1}].

- **Posuv na zub** – by neměl klesnout pod 0,05 mm z důvodu projevení vlivu poloměru ostří břitů nástroje. Například u hrubování je posuv co největší s přihlédnutím k hloubce řezu, tuhosti obrobku a výkonu frézky. Rozsah se obvykle pohybuje 0,05 až 0,4 mm. Určí se ze vztahu [7], [8]:

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

kde: v_f - velikost posuvu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$],

z - počet zubů nástroje [-],

n - otáčky nástroje [min^{-1}].

- **Hloubka záběru** – pohybuje se v rozmezí 0,5 až 20 mm i více (při hrubování). Je zapotřebí, aby byl obrobek dostatečně upnutý a nevznikaly vibrace. Vypočítá se ze vztahu [7], [8]:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

kde: a_p - hloubka záběru [mm],

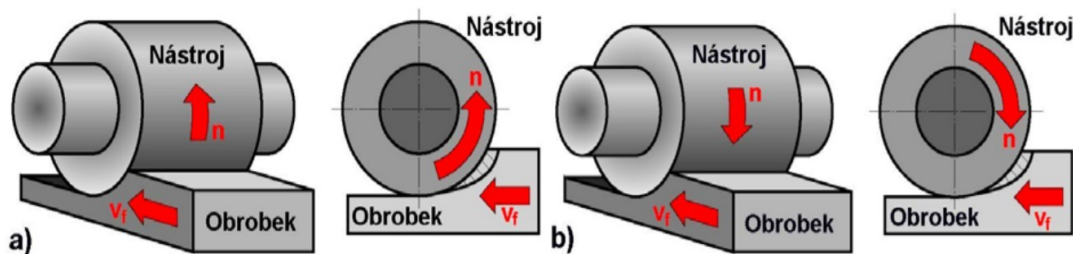
Q - velikost úběru materiálu [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$],

a_e - šířka záběru [mm],

v_f - velikost posuvu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$].

Podle polohy osy nástroje k obráběné ploše lze frézování rozdělit do čtyř skupin a to frézování: 1. válcové 2. čelní 3. okružní 4. planetové [6]

Válcové frézování se využívá při práci s válcovými a tvarovými frézami a rozlišují se na nesousledné a sousledné viz Obr. 2. [6]



Obr. 2 Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [7].

kde: n - otáčky nástroje [min^{-1}],

f_z - posuv [mm].

U **nesousledného** frézování je směr pohybu frézy proti posuvu obrobku. Průřez vznikající na obrobku se mění od nuly do finální maximální hodnoty. Tříská neodchází z obrobku v nulovém bodě tloušťky, ale po skluzu břitu po ploše vytvořené přechozím zubem. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující opotřebení nástroje. Řezná síla při nesousledném frézování působí směrem k nástroji a tím se snaží obrobek vytrhnout. Práce tímto způsobem je klidná, bez rázů a je vhodná pro frézování obrobku s tvrdou

povrchovou vrstvou. Břity do tvrdé vrstvy vstupují zespodu a odlamují ji. To se potom projeví na břitu, že se tak rychle neotupí. U nesousledného frézování je povrch materiálu horší, kvůli vysokému tření při vniknutí nástroje do materiálu, tím narůstají teploty v místě řezu a opotřebení nástroje. Vzniklá plocha nemá tak dokonalý povrch jako u sousledného frézování a příčina toho je: menší průměr frézy a vyšší posuvu na zub. [7]

Výhody:

- menší opotřebení stoje (šroubu a matice),
- záběr zubu nezávisí na hloubce řezu,
- na trvanlivost nástroje nemá vliv povrchu obrobku. [7]

Nevýhody:

- zhoršená jakost obrobené plochy,
- směr síly frézování s ohledem na upnutí. [7]

U **sousledného** frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Největší tloušťka třísky vzniká při vniknutí frézy do obrobku. Řezné síly působí směrem dolů proti stolu stroje. Může probíhat jen na přizpůsobeném stroji, při vymezení vůli a předpětí mezi maticí stolu frézky a posuvovým šroubem. Naopak mohou vznikat vůle nestejnoseměrného pohybu a může dojít k poškození nástroje i stroje. Z důvodu minimálního opotřebení nástroje a vytvoření kvalitního povrchu je dána přednost souslednému frézování. Naopak to může vést k prodloužení obráběcího času (v záběru více zubů) a tím nastat časové ztráty. [7]

Výhody:

- vyšší trvanlivost nástroje,
- použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- jednodušší upínání (síla řezání přitlačuje obrobek ke stolu),
- obrobená plocha osahuje vyšší jakosti. [7]

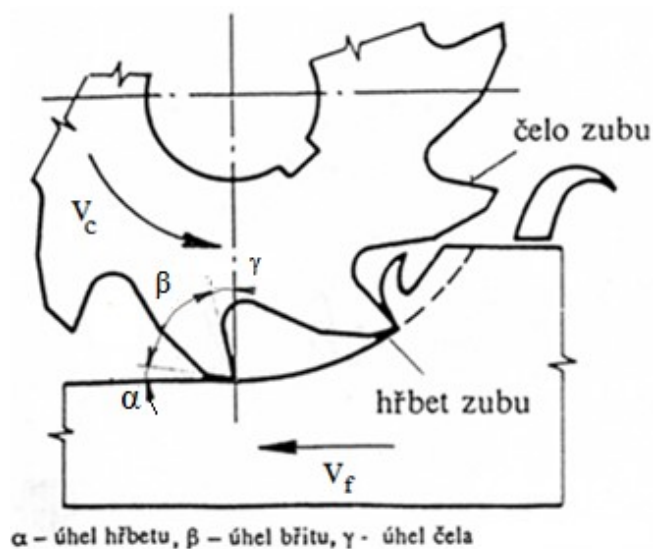
Nevýhody:

- silová zátěž každého zubu při záběru,
- nevhodné při obrábění polotovarů s tvrdým a znečištěným povrchem. [7]

2.1 Geometrie břítu frézy

Aby mohl břit odebírat třísku z obrobku, musí být k tomu upraven. Každý břit má klínovité provedení zakončené břitem, tvořený dvěma plochami: čelo a hřbet viz Obr. 3. V jejím průřezu vznikne ostří, které slouží k odebírání třísky. Vzájemná poloha ploch břítu nástroje a obrobku vytváří geometrii břítu. A je závislá i od geometrie řezné destičky. Frézy rozdělujeme jako celistvé, dělené nebo kombinované. [7]

Hodnoty jednotlivých úhlů závisí na obráběném materiálu a u normalizačních fréz mají stanovenou hodnotu. Konstanta v_c představuje řeznou rychlost a v_f posuvová rychlost. [6]



Obr. 3 Geometrie břítu [6].

kde: v_f – posuvová rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$].

2.2 Základní úhly na zubu nástroje

- Úhel hřbetu α – jeho úkolem je snižovat tření hřbetu zubu na obráběné ploše. S nabývajícím hodnotou klesá tření. Velikost je omezen, aby nedocházelo k zeslabování zubu a tím i snížení jeho pevnosti. Rozmezí 3 až 25 ($^\circ$) a jeho optimální hodnota je 8 až 12 ($^\circ$). [6], [7]
- Úhel břítu β – je definováno: čím menší hodnota úhlu, tím je snadnější jeho vniknutí do materiálu. Hodnota je omezena pevností břítu. U frézování málo pevných materiálů má úhel menší hodnotu, naopak u tvrdých materiálů musí být hodnota větší. Musí snést zatížení vyvolané velkým řezným odporem. Čím je úhel tohoto

klínu větší, tím větší je odpor při oddělování třísky. Podle tohoto hlediska by měl být úhel břitu co nejmenší, aby obroben plocha měla dobrou kvalitu. Velikost úhlu břitu je určena velikostí úhlu čela, z což je patrné z Obr. 3. Jeho rozmezí je 40 až 105°. [6], [7]

- Úhel čela γ – usnadňuje tvorbu třísky a vniknutí do materiálu. Má největší vliv na průběh řezání, protože úhel určuje polohu čela nástroj vzhledem k pracovní rovině řezu. S nárůstem úhlu zeslabuje celý břit frézy a dochází ke zhoršení kvality povrchu, proto je omezena. Rozmezí se pohybuje od -8 až +8°. [6], [7]
- Úhel sklonu ostří λ_s – má vliv na odchod třísky po čele, na velikost přechování třísky a na jakost obrobené plochy. Při sklonu úhlu 0° svinuje se na čele nože tříska do spirály. Jako šroubovice odchází od nože ve směru proti posuvu nože při záporném úhlu. U kladného úhlu má tvar šroubovice a odchází ve směru obrobku. Rozmezí může být +20 až -40°. [6], [7]

3 Metody měření topografie povrchu

V současnosti je dostupných mnoho přístrojů a metod pro vyhodnocení drsnosti povrchu, jak pro profilovou metodu, tak i pro plošnou metodu. Představíme si zde kontaktní a bezkontaktní zařízení a také jejich metody vyhodnocení parametrů drsnosti. Při výrobě zařízení je kladen důraz na citlivost přístrojů vůči vibracím apod. nebo u bezkontaktních zařízení na okolní světlo.

Norma ČSN EN ISO 25178-6 popisuje klasifikaci systému metod používaných při měření textury povrchu. [9]

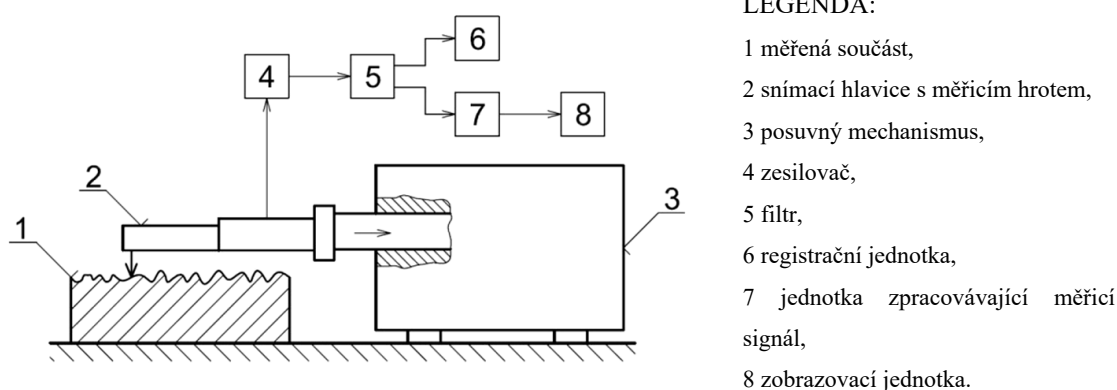
- Čárová - profilovací metoda.
- Metoda topografie plochy.
- Metoda integrování plochy. [9]

Při zjišťování, jestli plocha splňuje předepsanou rozměrovou přesnost, se nejčastěji používají způsoby měření:

- absolutní - jsou měřeny celkové rozměry součástí,
- komparační - jsou zjišťovány hodnoty mezních úchylek od jmenovitého rozměru,
- toleranční - je zjišťováno, zda je nebo není plněn daný předpis. [10]

3.1 Měření s dotykovými přístroji

Profilové měření pro profilové měření dotykovou metodou je stanoveno normou ČSN EN ISO 3274 [11]. Doposud v praxi je nejrozšířenější přístroj pro měření drsnosti povrchu dotykový profilometr (Obr. 4).



Obr. 4 Princip měření dotykovým profilometrem [12]

Tato metoda s pomocí ostrého hrotu získává informace o profilu a jeho posouvání po měřeném povrchu je v předem zvoleném směru. Dotykový profilometr se skládá z mechanické a elektrické části viz Obr. 4. Mechanická část je tvořena stolkem, na který je uchycen měřený vzorek a rameno se snímacím diamantovým hrotem sloužící k měření nerovnosti povrchu. Jeho poslední částí je elektromotor, který slouží pro přímočarý vratný pohyb. V elektrické části pomocí snímacího hrotu je přijímán elektrický signál a z něj následně konvergován na analogový signál pomocí zesilovače sloužící k vyhodnocení požadovaných parametrů o jeho profilu. Výstup je možno sledovat na připojeném počítači. Výsledek nám udává grafické znázornění změny výškového rozdílu $Z(x)$ v závislosti na poloze x . [10]

Přístroje k měření této metody můžeme rozdělit na dvě skupiny, a to podle toho jaký mají druh snímače:

absolutní – měřící základnu tvoří přímá nebo tvarová dráha snímače,

relativní – dráha s generovanou opěrnou patkou, která klouže po měřeném povrchu. [10]

Pro správnost a srovnatelnost výsledků jsou hodnoty normalizovány (podle normy ČSN EN ISO 3274) [11]. Ideální tvar snímacího hrotu s kulovou špičkou o poloměru $2\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ a vrcholovým úhlem kužele 60° , 90° . Měřící přitlačná síla ve střední poloze snímacího hrotu $0,00075\text{ N}$ (špička musí být neustále přitlačena na povrchu). [10]

Výhody:

- snímací hrot odsune nečistoty z dráhy měření a tím nevznikají chyby měření,
- měření součásti ve vodorovné poloze jako například u kužele a není zapotřebí vyrovnávat šikmou plochu,
- korekce výsledků s dalšími dotykovými přístroji,
- přímé měření parametrů topografie povrchu. [10]

Nevýhody:

- nedokáže změřit nerovnosti menší než je průměr špičky,
- u měkkých materiálů může dojít k poškození povrchu,
- adhezivní povrch může zachytit hrot k měkké součásti a tím poškodil přístroj,
- pomalý pohyb hrotu po povrchu zkoušeného materiálu. [10]

3.2 Bezkontaktní metody měření

Tato kapitola obsahuje plošné měření jako je profilové měření, dané normou ČSN EN ISO 25178-602 [13].

U bezkontaktních přístrojů platí opačný postup vyhodnocování dat než u kontaktních přístrojů. A to že je nejdříve provedena rekonstrukce dané plochy, na základě které jsou po daných filtračních operacích vyhodnocovány dané parametry textury povrchu. Na základě těchto dat jsou i profilové parametry získávány, a to definicí žádaného profilu napříč touto plochou. Oproti tomu kontaktní metoda funguje výhradně na základě metody profilové, kdy na základě profilů je skládána plocha, nikoli že jsou profily z dané plochy extrahovány jako v bezdotykové metodě. [14]

Výhody bezdotykových metod

- Obousměrné snímání povrchu,
- měřidla nejsou poškozována a opotřebována jako u dotykových zařízení,
- možnost měření měkkých, abrazivních a citlivých materiálů,
- nejsou omezeny velikostí snímacím hrotem. [15]

Nevýhody bezdotykových metod

- Riziko ztráty dat,
- výsledek měření závisí na okolním prostředí (osvětlení, vibrace, apod.). [15]

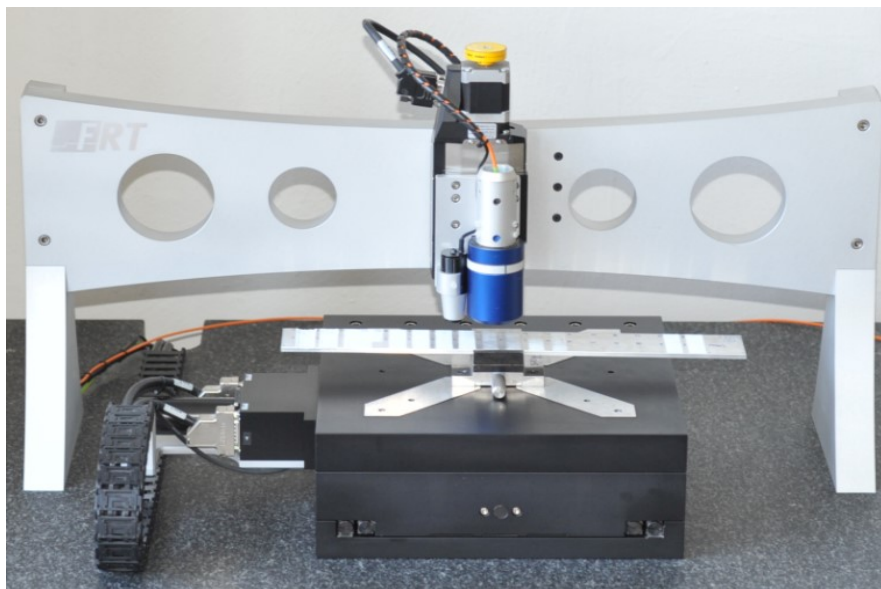
3.2.1 Optický profilometr MicroProf FRT

MicroProf FRT již nám poskytuje měření profilu povrchu a také skenování plochy ze zkoumaného povrchu materiálu. Senzor, ležící na konstrukci zařízení je pevně uchycen (viz Obr. 5) a pohybuje se v ose z . Měřený vzorek leží na odměřovacím stolku, který zaručuje přesný pohyb definovanou rychlostí ve směru os x a y . Získané informace formou trojrozměrného obrazu topografie z povrchu umožňuje širší analýzu textury povrchu, jako je například výpočet objemového úběru materiálu. Vybrané výškové parametry drsnosti byly spočítány z měřených profilů struktury povrchu. [16]

Profilometr a další jiné optické metody jsou založeny na principu bílého světla, již je ze zdroje přiváděno optickým vláknem ke spojné čočce. Tato čočka zaostřuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztažnou rovinou. Jakmile dopadne na měřený povrch vzorku, zaostřené světlo je odraženo zpět do čočky a optickým vláknem přivedeno do spektrometru. Hodnota vlnové délky maxima intenzity světla

vystupujícího ze spektrometru je pomocí kalibrační tabulky převedena na hodnotu vzdálenosti mezi senzorem a povrchem vzorku. Tímto jsou získány informace o výškové nerovnosti povrchu. [16]

Veškeré údaje o optickém profilometru jsou uvedeny v příloze A.



Obr. 5 Optický profilometr MicroProf FRT [16]

4 Způsoby vyhodnocování

Pro zpracování naměřených hodnot se využívá řady parametrů. Dříve se hojně používaly profilové parametry definované normou ČSN EN ISO 4287. [1] Ačkoliv v poslední době se stále více využívá měření plošných parametrů, které jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 25178-2. [2]

Dnes se dbá na užívání většího množství normovaných (i nenormovaných, ale přesto ještě používaných) parametrů pro jednoznačný popis dané plochy. Nicméně vědecké organizace na to reagují a mají docílit podporu případně ukazovat směr vývoje rozhodujících odvětví průmyslu. [14]

4.1 Profilové parametry

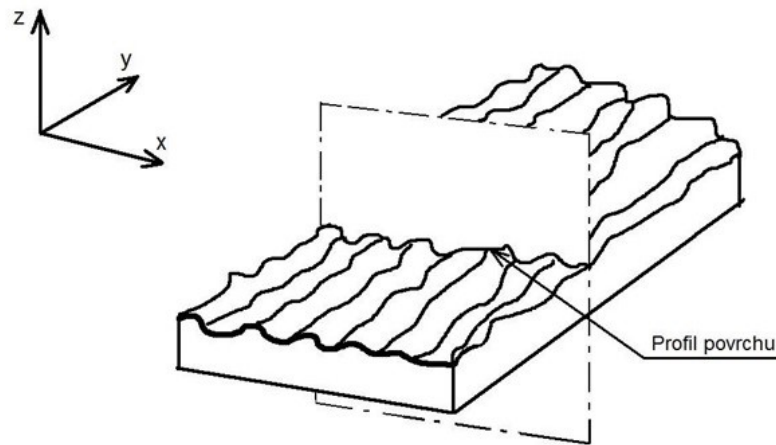
Profilové parametry jsou definované dle normy ČSN EN ISO 4287 [1].

Souřadnicový systém, ve kterém jsou definovány parametry struktury povrchu. Obecně je využíván pravoúhlý souřadný systém, ve kterém osy tvoří pravotočivou kartézskou soustavu. Osa je x ve směru snímání souběžná se střední čarou, osa y také leží na skutečném povrchu a osa z směřuje z povrchu. [1]

Základní profil – jako úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtr λ_s . Prezentuje základnu pro číslicové zpracování profilu pomocí filtrů profilu a pro výpočet parametrů profilu. Je základem pro hodnocení parametrů základního profilu. [1]

Skutečný povrch – je definován, jako povrch omezující těleso a oddělujícího od okolního prostředí. [1]

Profil povrchu – jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny, nejčastěji kolmé na určitý povrch, znázorněno na Obr. 6. vhodný směr řezné roviny je ten, ve kterém jsou hodnoty výškových parametrů maximální. [1]



Obr. 6 Skutečný profil povrchu [9]

Vyhodnocovaná délka l_n

Délka, na které se vyhodnocují hodnoty parametrů drsnosti povrchu. Obsahuje jednu nebo více základních délek viz Obr. 7. [1]

Základní délka l_r

Délka základní čáry, která odděluje nerovnosti charakterizující drsnost povrchu. Volba délky nesmí zapříčinit vznik vlivu vlnitosti a úchylek tvaru. Základní délka je číselně rovna hodnotě vlnové délky profilového filtru λ_c . [1]

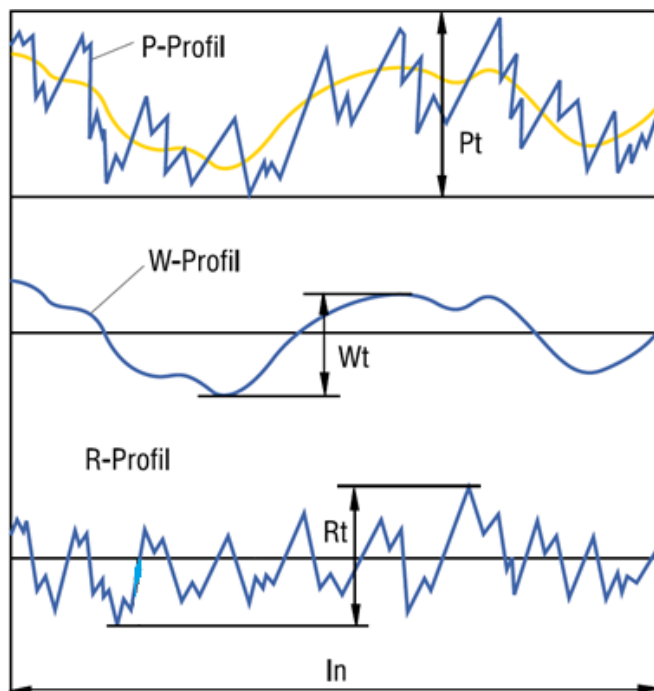
4.1.1 Geometrické parametry dle ČSN EN ISO 4287

P – parametr: parametr vypočítaný ze základního profilu (Obr. 7) po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . P_t – hloubka profilu je nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky l_n . [17], [1]

R – parametr: odvozen je ze základního profilu (Obr. 7) potlačením dlouhovlnných složek použitím λ_c filtru. R_t – největší hloubka drsnosti je svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze filtrovaného profilu drsnosti uvnitř měřené délky l_n . [17], [1]

W – parametr: parametr vypočítaný z profilu vlnitosti (Obr. 7) a odvozen postupnou aplikací filtru λ_f a filtru λ_c . W_t – hloubka vln je vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti (drsnost odfiltrována) uvnitř měřené délky l_n . Požívá se ke kontrole výrobního postupu, u kterého vlnitost představuje funkční kritérium. [17], [1]

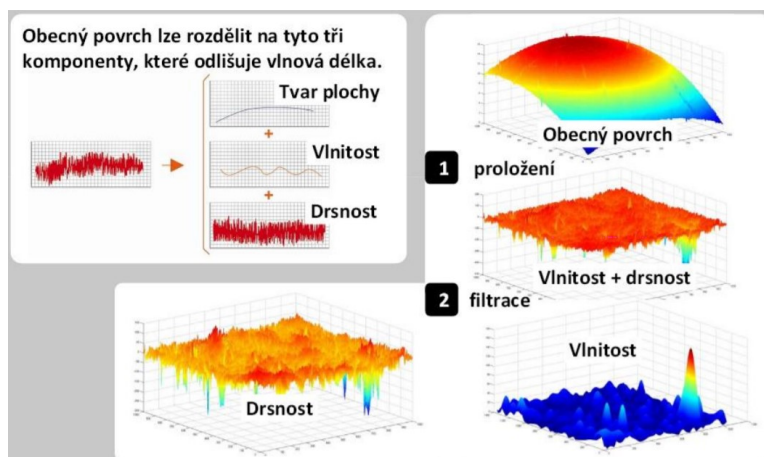
Vlnitost je oproti drsnosti rozměrnější nerovností. Na této nerovnosti je superponována drsnost. Vlnitost je považována spíše za vliv působení výrobního stroje na obráběnou součást. Nejčastěji to způsobuje kmitání nebo upnutí obrobku.



Obr. 7 Geometrické parametry [17]

Tvar plochy

Je skutečný povrch při vyloučení drsnosti a vlnitosti viz Obr. 8.

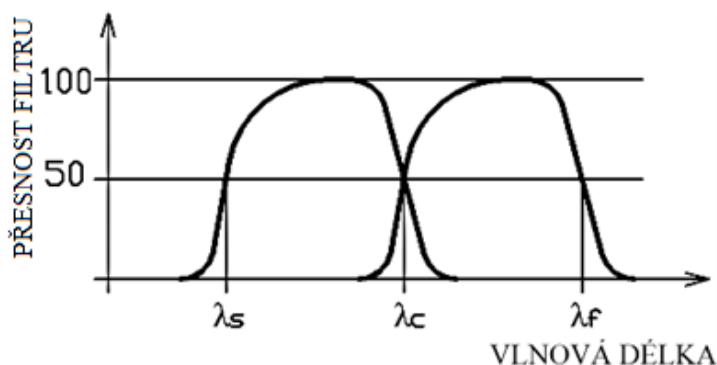


Obr. 8 Obecný povrch a získání drsnosti z obecného povrchu. [18]

4.1.2 Filtrování a proložení povrchu

Z naměřených hodnot profilu povrchu se musí odfiltrovat nežádoucí složky. Za pomoci následujících filtrů dle normy ČSN ISO 16610-21 [19] je provedena separace dlouhovlnných a krátkovlnných složek profilu podle příslušné vlnové délky cut-off. Filtry původně vznikly zvláště pro kontaktní měřicí zařízení, kdy v procesu byla zavedena taky korekce poloměru snímacího hrotu. [20] Je nutností používat fázové korigované filtry profilu to jsou filtry, které nezpůsobují fázový posuv vedoucí k asymetrickému zkreslení profilu. [10]

Norma ČSN EN ISO 16610-21 [19] se závislostí na drsnost dané plochy definují tři filtry se stejnými přenosovými vlastnostmi, ale odlišnými hodnotami mezní vlnové délky cut-off. Tyhle filtry slouží pro získání profilu drsnosti a vlnitosti, na základě kterých se dále vyhodnocují parametry definující danou plochu. [19] Podmínky přenosové charakteristiky profilu drsnosti a vlnitosti jsou, že na hodnotě mezní vlnové délky musí mít 50% přenos, viz Obr. 9. [1]



Obr. 9 Přenosová charakteristika profilových filtrů [1]

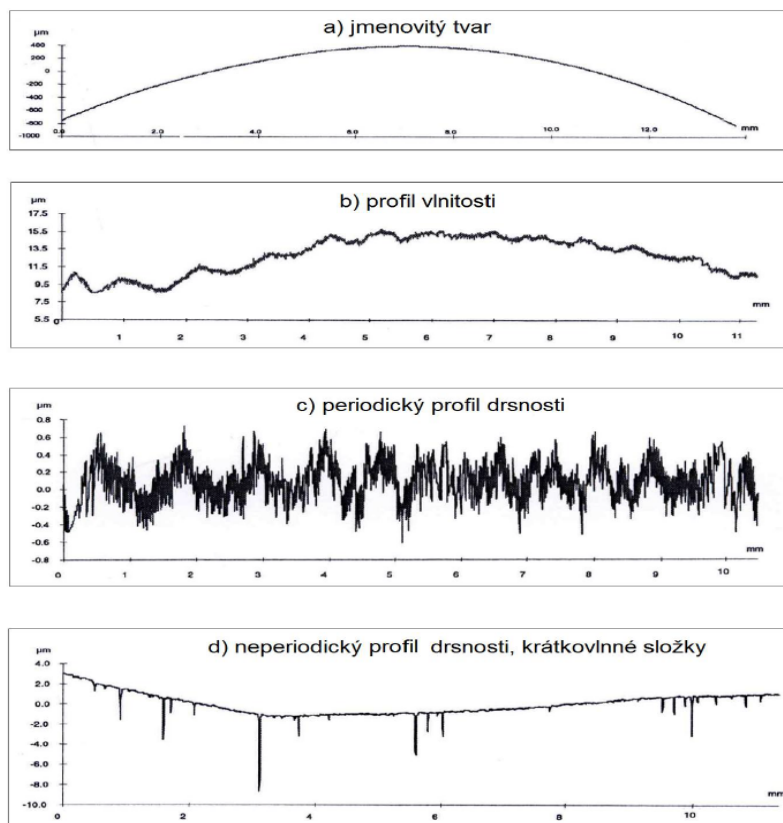
Filtrování probíhá následovně: nejprve se na skutečný profil povrchu nanese krátkovlnný filtr λ_s , s jeho pomocí je odfiltrují od naměřeného profilu složky s kratší vlnovou délkou, které jsou na povrchu jako například rýhy, póry, koroze, apod. Tyto nepřesnosti povrchu viz oObr. 10d. nebereme v úvahu při hodnocení textury povrchu. Tak vznikne **základní profil**. [1] Filtr definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu. [10]

Po aplikaci filtru λ_c na základní profil jsou potlačeny dlouhovlnné složky profilu. Po oddělení složek drsnosti a vlnitosti zůstává pouze **profil drsnosti** viz Obr. 10c. [10]

Poslední typ profilu je **profil vlnitosti** viz Obr. 10 b, a ten vzniká ze základního profilu kombinovaným potlačením krátkovlnných složek filtrem λ_c a dlouhovlnných složek filtrem

λf . Než se aplikuje filtr λf mělo by být z celkového profilu odstraněn jmenovitý tvar. obecně je doporučovaná metoda nejmenších čtverců, viz Obr. 10a. [10]

Posouzení profilu dle normy ČSN EN ISO 4287 [1] se vykoná standardně pomocí střední čáry profilu. Pro profil drsnosti tahle čára představuje dlouhovlnné složky potlačené filtrem λc , pro profil vlnitosti dlouhovlnné složky potlačené filtrem λf a pro základní profil jde o čáru, přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu definované pomocí metody nejmenších čtverců. [10]



Obr. 10 Složky textury povrchu [20]

4.1.3 Sledované profilové parametry dle normy ČSN EN ISO 4287

Norma ČSN EN ISO 4287 představuje geometrické požadavky na výrobu (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termín, definice a parametr struktury povrchu. Stanovuje termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnosti, vlnitosti a základního profilu) profilovou metodou. [1] Přehled sledovaných parametrů viz

Tab. 2 až Tab. 4.

Tab. 2 Výškové parametry (výstupky a prohlubně) [1]

Parametr drsnosti	Definice parametru
	Největší výška výstupku profilu
Rp	Největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu v rozsahu základní délky
Rz	Součet výšky největšího výstupku a hloubky nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky

Tab. 3 Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic) [1]

Parametr drsnosti	Definice parametru
	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Ra	Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky

Tab. 4 Délkové parametry [1]

Parametr drsnosti	Definice parametru
	Průměrná šířka prvků profilu
RSm	Aritmetický průměr šířek prvků X_s prvků profilu v rozsahu základní délky

Definice plošných parametrů dle normy ČSN EN ISO 4287:**Ra - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu**

Je definována jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v daném rozsahu základní délky l_r (viz Obr. 11). [1]

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4)$$

kde: $Z(x)$ - výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x [μm]

l_r - základní délka profilu [mm]

Jeho rozšíření je podpořené taky tím, že je tento parametr zahrnutý v přesnosti použité normy ve výkresové dokumentaci v případě, kdy není zadána konkrétní drsnost určité

plochy. Parametr nerozlišuje výstupky od prohlubní, viz Obr. 11, a tak plochy vytvořené rozdílnými metodami není vhodné porovnávat pomocí tohoto parametru. [1]



Obr. 11 Znázornění parametru R_a [20]

R_p – Největší výška výstupku profilu

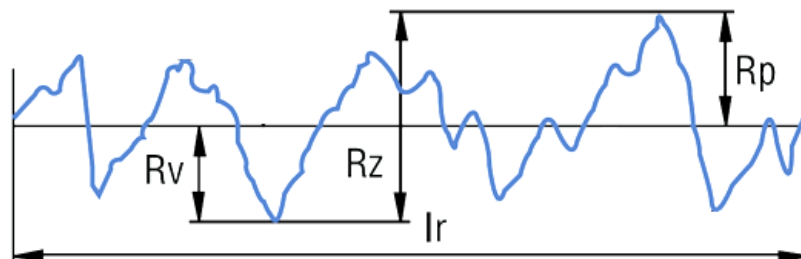
Jedná se o výšku Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu dané základní délky l_r (viz Obr. 12) [1].

R_v – největší výška prohlubně profilu

Jedná se o hloubku Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu dané základní délky l_r (viz Obr. 12) [1].

R_z – největší výška profilu

Největší výška je definovaná jako součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (viz Obr. 12). Je citlivější na změny textury povrchu, protože se jedná čistě o výškový parametr, a ne o parametr vycházející z průměru. [1]

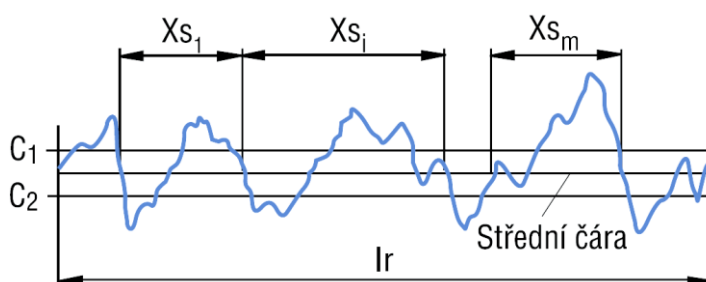


Obr. 12 Sledované výškové parametry [17]

RSm - Průměrná šířka prvků profilu

Je definovaná jako aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu pro rozsah dané základní délky l_r (viz Obr. 13). Parametr RSm vyžaduje výškové a délkové omezení. Jestliže není jinak určeno, tak omezení výšek je 10% Rz a omezení roztečí 1% základní délky. Obě zmíněné podmínky musí být splněny. [1]

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad (5)$$



Obr. 13 Parametr RSm [17]

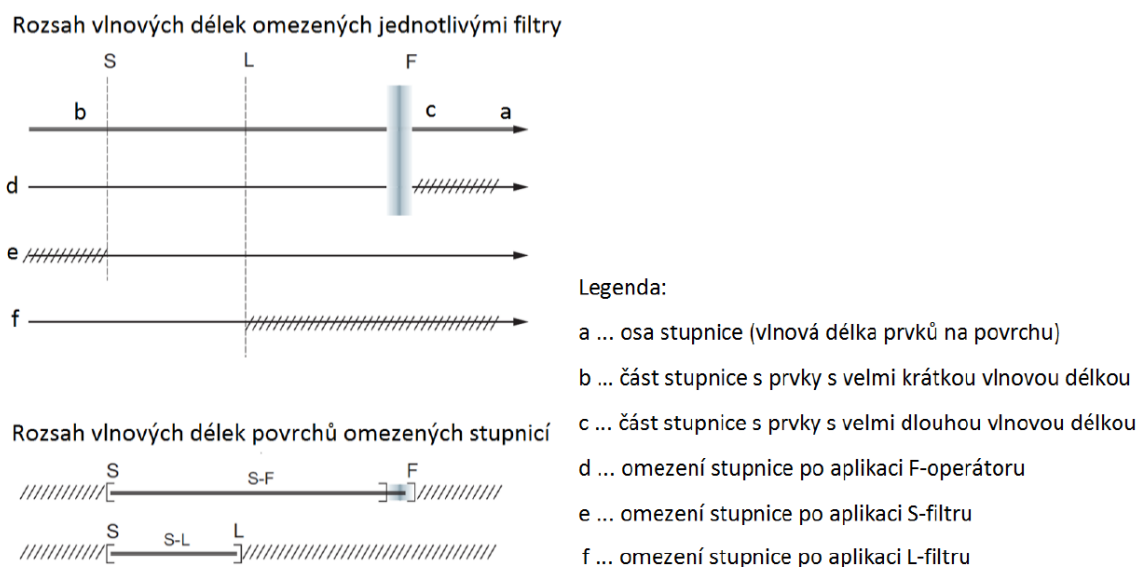
4.2 Plošné parametry povrchu

Plošné parametry definované normou ČSN EN ISO 25178-2 [2] umožňují kvantitativní hodnocení plochy všemi technickými významnými směry. V normě je definováno celkem 7 výškových parametrů textury povrchu. Díky profilovému hodnocení se také dá určit množství, rozložení a výška jednotlivých bodů kontaktu mezi dvěma plochami. V plošném hodnocení je tudíž možno uvést obecnou texturu a celkový tvar plochy. Lze tedy lépe určit jejich funkční vlastnosti za provozu. [2] Norma rozlišuje dva druhy plošných parametrů, a to **parametr pole** a **parametr prvku** jsou nejvýznamnějšími změnami v metodice hodnocení povrchu.

4.2.1 Filtrování

Nejprve je na naměřený povrch aplikován **S-filtr**, pomocí něj se odstraní z povrchu prvky s velmi krátkou prostorovou vlnovou. Při použití S-filtru vznikne poté primární povrch. [2] Dále je na prvním povrchu aplikována matematická operace a na základě metody nejmenších čtverců vyřadí vliv tvaru z primárního povrchu jako **F-operace**. Po aplikaci S-filtru a F-operace vznikne **S-F povrch**. Na tento povrch se aplikuje **L-filtr** sloužící k odstranění z povrchu prvky s dlouhou prostorovou vlnovou délkou a vznikne **S-L povrch**.

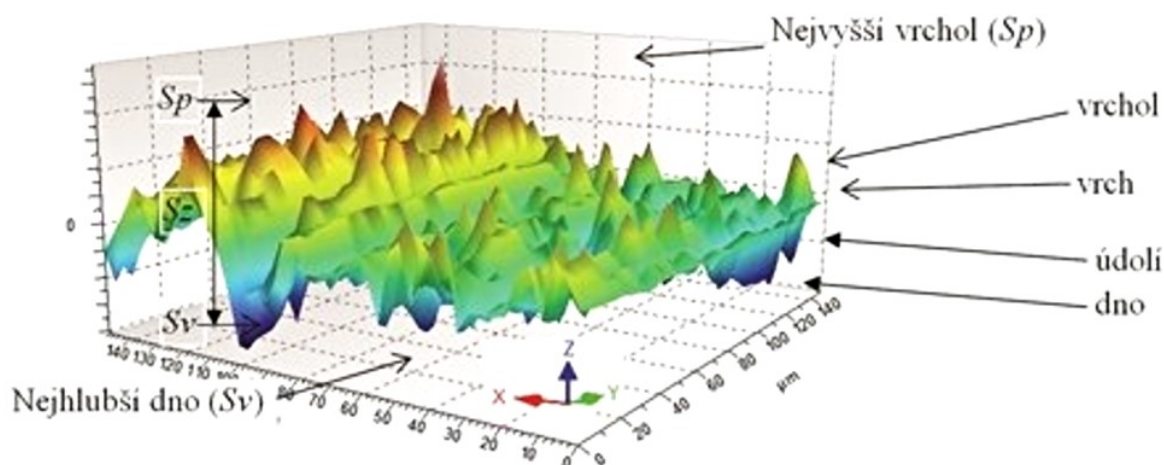
S-L a F-L povrchy se jmenují **povrchy omezené stupnicí**. Tyto konkrétní filtry jsou upřesněny v normě ČSN EN ISO 25178-2 [2]. Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem, F-operací a S-F a S-L povrchy jsou graficky znázorněny na Obr. 14.



Obr. 14 Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem, F-operací a S-F a S-L povrchy [2]

4.2.2 Sledované parametry

Většina parametrů pole, viz Obr. 15, je určena na základě integrálů místo součtů, tím se zvýrazní spojitost plošné metody. Norma ČSN EN ISO 25178-2 [2] rozděluje parametry pole na prostorové, výškové, hybridní a funkční. Parametry pole jsou rozděleny do dvou skupin, založené na analýze plochy S a objemu V . Některé V-parametry mají značení S a stále jsou řazeny do V-parametrů. Způsobeno je to tím, že plošné charakteristiky jsou vyhodnocované na základě objemu materiálu.



Obr. 15 Vybrané výškové parametry [21]

Sledované S-parametry

Parametry jsou definovány normou ČSN EN ISO 25178-2 [2]. Plošné parametry dělíme na parametry: výškové, prostorové, hybridní, smíšené, funkční a související. Pro experimentální část bakalářské práce byly vybrány 4 výškové parametry a to S_a , S_z , S_v , S_p , které budou níže podrobněji popsány.

Sa - Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu

Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř předem určené plochy (A). Je dán vztahem [2]:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| \, dx dy \quad (6)$$

Sz - Maximální výška omezené stupnice povrchu

Je definovaná jako součet maximální hodnoty výšky piky S_p a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř předem určené plochy S_v (viz Obr. 15) [2].

Pojem „pik“ znamená „vrchol“, tento pojem je odvozen od anglického slova „peak“, což v překladu znamená výstupek. Je dán vztahem [2]:

$$S_z = S_p + S_v \quad (7)$$

Sp - Maximální výška piky (vrcholu) omezené stupnice povrchu

Je definovaná jako největší hodnota výšky piky (vrcholu) uvnitř předem určené plochy (viz Obr. 15). je dán vztahem [2]:

$$S_p = \max\{z_p(x, y)\} \quad (8)$$

Sv - Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu

Je definovaná jako hloubka prohlubně uvnitř předem určené plochy, která je zmenšená o její nejmenší hodnotu (viz Obr. 15). Je dán vztahem [2]:

$$S_v = \max\{|z_p(x, y)|\} \quad (9)$$

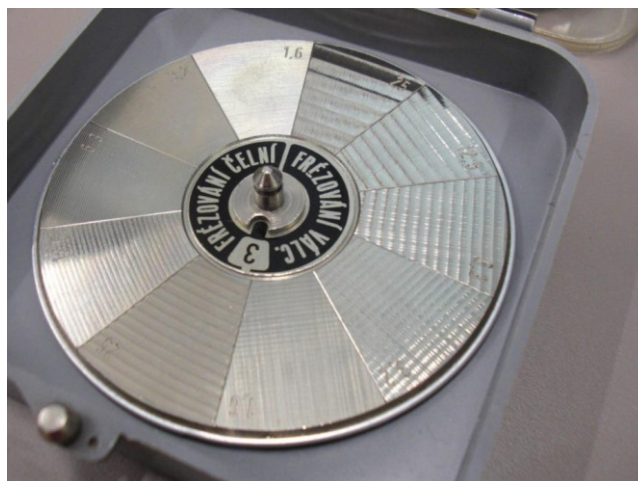
5 Experimentální část

Bakalářská práce měla za úkol porovnat vyprané profilové a plošné parametry drsnosti povrchu na vzorcích s rozdílnou hodnotou parametru drsnosti Ra . Vzorky (etalony) byly vytvořeny pomocí technologie frézování čelní plochy.

Experiment byl zhotoven ve spolupráci s Ústavem geoniky AV ČR v. v. i., pomocí optického profilometru MicroProf FRT, na kterém bylo provedeno měření. Následné hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru SPIP 6.7.0 (Scanning Probe Image Processor – Obrazový procesor snímací sondy).

5.1 Popis vzorku

Jako předloha pro experimentální část sloužila etalonová vzorkovnice drsnosti povrchu od firmy SUPRAPHON. Přesněji řečeno, jde o kruhové vzorky s použitou technologií třískového obrábění: **čelní frézování**. Rozměr kruhové vzorkovnice je 65 mm. Skládá se z deseti vzorků. Z toho pět vzorků bylo vytvořeno technologií frézování za použití válcově čelní frézy. Dalších pět vzorků bylo vyhotoveno pomocí čelní frézy, viz obr.16. Ke vzorkům bylo přiděleno značení ve tvaru P1–P10, kde byl rozsah parametru drsnosti Ra 1,6 – 25 μm . Přičemž čím větší hodnota P tím větší parametr drsnosti, viz tab. 7. Vzorky pro experiment byly použity: P1, P2 a P3, viz tab. 5 s vyznačenými červenými hodnotami, kde byla proměřena plocha o rozměrech 5x5 mm.



Obr. 16 Frézovací vzorkovnice

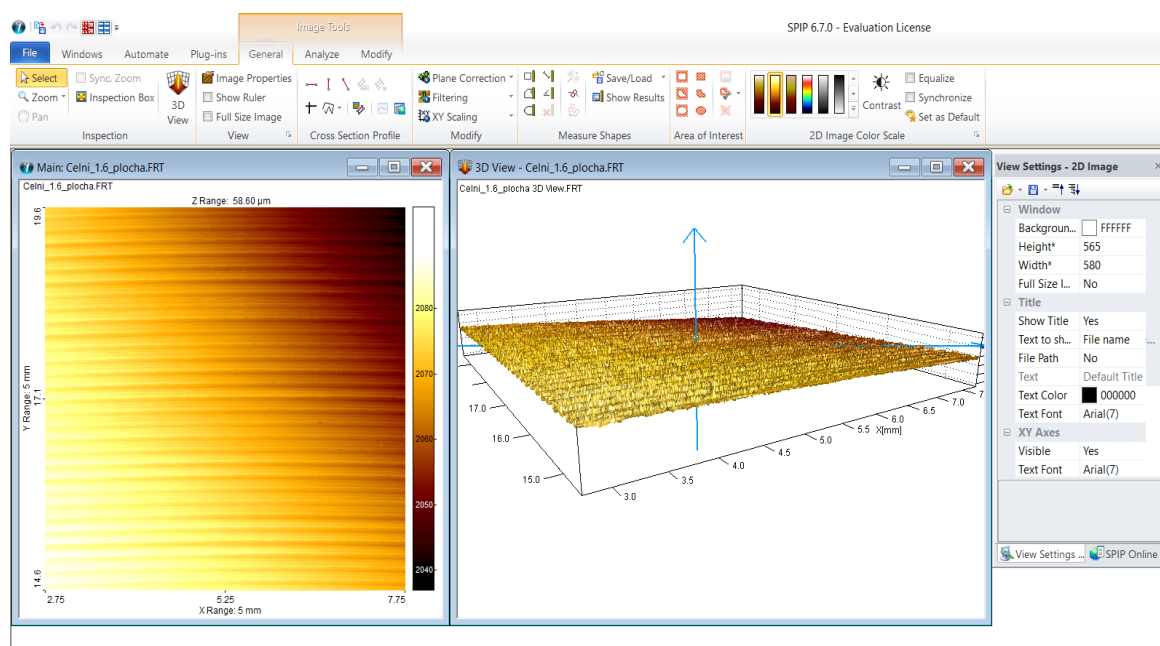
Tab. 5 Parametry drsnosti vzorkovnice

	P1	P2	P3	P4	P5
Ra [μm]	1,6	3,2	6,3	12,5	25
Rp [μm]	3,2	6,3	16	32	50
Rz [μm]	6,3	12,5	25	50	100

5.2 Měření za pomoci profilometru MicroProf FRT

Zařízení, na němž bylo provedeno měření pro experimentální část bakalářské práce, je popsáno v kapitole 3.2.1 a technické parametry profilometru v příloze A.

Hodnocený vzorek byl umístěn na pohybujiící se stolek. Povrch byl snímán v 1000 linií, přičemž vzdálenost mezi liniemi činila 5 μm . Senzor bílého světla snímal vzorek a všechny jeho nerovnosti byly graficky znázorněny v programu SPIP (viz Obr. 18). S pomocí tohoto programu byly vyhodnoceny všechny vzorky a provedena jejich analýza.



Obr. 18 Prostředí SPIP programu

5.3 Vyhodnocení profilu povrchu

Analýza jednotlivých vzorků (P1 až P3) byla provedena pomocí softwaru SPIP, kde u všech linií byly dle normy ČSN EN ISO 4287 [1] zjištěny profilové parametry drsnosti. Zjištěné hodnoty jsou zapsány v tab. 6 až 8. Vybrané profilové (výškové a délkové) parametry drsnosti (Ra , Rz , Rv , Rp a RSm) které byly vybrány pro analýzu povrchu zkoumaných vzorků, jsou blíže popsány v podkapitole 4.1.3. Pro každý získaný parametr byla určena průměrná hodnota \bar{x} , maximální a minimální hodnota (max a min) a směrodatná odchylka $s(x)$, které byly třeba pro finální vyhodnocení. Výpočet průměru a výběrové směrodatné odchylky parametru Ra jsou uvedeny níže.

Výběrový průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

Vzor výpočtu hodnoty Ra :

$$\bar{x} = \frac{1}{6} \cdot (1.33 + 1.37 + 1.32 + 1.35 + 1.34 + 1.36) = 1.34 \mu\text{m}$$

Výběrová směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

Vzor výpočtu hodnoty Ra :

$$s(x) = \sqrt{\frac{(1.33 - 1.35)^2 + (1.37 - 1.35)^2 + \dots + (1.36 - 1.35)^2}{6 - 1}} = 0.02 \mu\text{m}$$

kde: n – pořadí měření

x_i – naměřené hodnoty parametrů drsnosti

Tab. 6 Profilové parametry drsnosti vzorku P1 – $R_a = 1,6 \mu\text{m}$

hodnota	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_p [\mu\text{m}]$	$R_v [\mu\text{m}]$	$R_{Sm} [\text{mm}]$
1	1,33	7,29	3,83	3,46	0,12
2	1,37	7,75	4,12	3,63	0,14
3	1,32	7,11	3,64	3,47	0,13
4	1,35	8,98	5,44	3,53	0,12
5	1,34	7,83	4,33	3,50	0,12
6	1,36	7,40	4,13	3,27	0,12
\bar{x}	1,35	7,73	4,25	3,48	0,13
max	1,37	8,98	5,44	3,63	0,14
min	1,32	7,11	3,64	3,27	0,12
s (x)	0,02	0,67	0,63	0,12	0,01

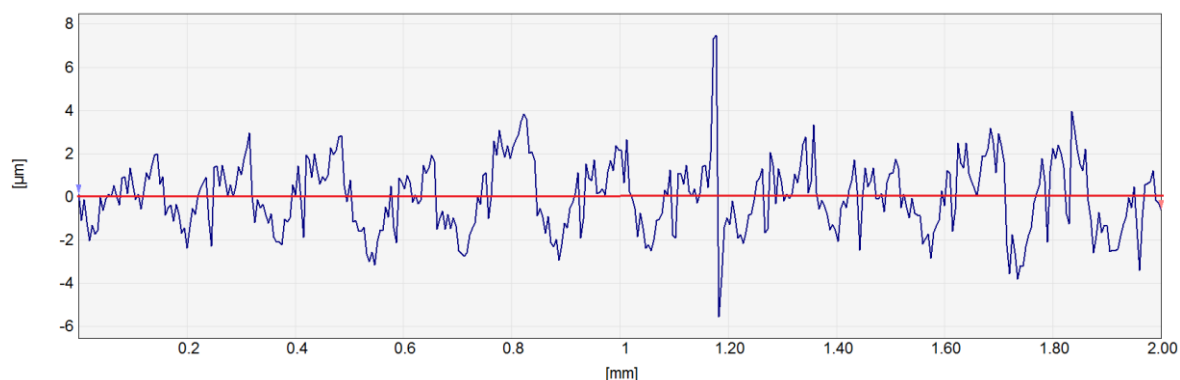
Tab. 7 Profilové parametry drsnosti vzorku P2 – $R_a = 3,2 \mu\text{m}$

hodnota	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_p [\mu\text{m}]$	$R_v [\mu\text{m}]$	$R_{Sm} [\text{mm}]$
1	2,77	15,27	8,48	6,79	0,24
2	2,75	15,07	8,51	6,56	0,24
3	2,77	14,67	8,43	6,25	0,24
4	2,78	14,55	8,31	6,24	0,24
5	2,73	14,59	8,07	6,52	0,24
6	2,79	15,04	8,56	6,48	0,24
\bar{x}	2,77	14,87	8,39	6,47	0,24
max	2,79	15,27	8,56	6,79	0,24
min	2,73	14,55	8,07	6,24	0,24
s (x)	0,02	0,30	0,18	0,21	0

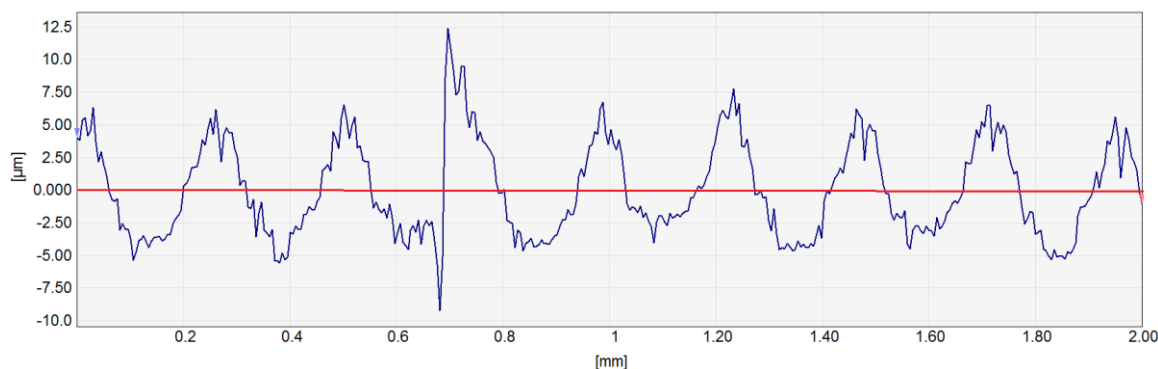
Tab. 8 Profilové parametry drsnosti vzorku P2 – $R_a = 6,3 \mu\text{m}$

hodnota	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_p [\mu\text{m}]$	$R_v [\mu\text{m}]$	$R_{Sm} [\text{mm}]$
1	5,67	28,3	17,05	11,25	0,34
2	5,67	26,45	15,27	11,18	0,34
3	5,66	27,49	16,18	11,31	0,34
4	5,67	26,29	15,2	11,09	0,34
5	5,65	27,33	15,55	11,78	0,34
6	5,66	27,2	15,73	11,46	0,34
\bar{x}	5,66	27,18	15,83	11,35	0,34
max	5,67	28,3	17,05	11,78	0,34
min	5,65	26,29	15,2	11,09	0,34
s (x)	0,01	0,73	0,69	0,23	0

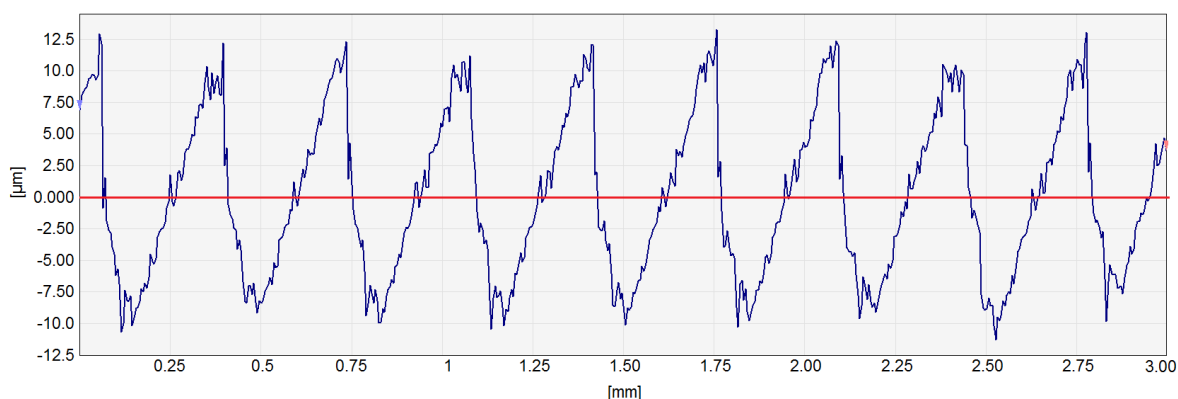
U jednotlivých vzorků se v programu SPIP vybrala na povrchu 1 svislá linie o rozměru 2 mm a 3 mm, kde půjde co nejlíp poznat na profilových křivkách rozdíly v drsnosti na povrchu. Získaný signál a členitost profilu je znázorněna viz Obr. 18 až Obr. 20.



Obr. 18 Profil drsnosti vzorku P1



Obr. 19 Profil drsnosti vzorku P2



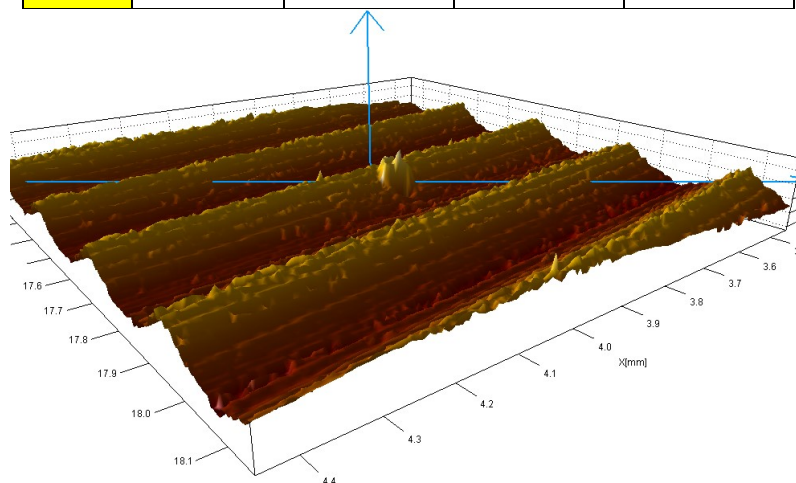
Obr. 20 Profil drsnosti vzorku P3

5.4 Vyhodnocení plochy povrchu

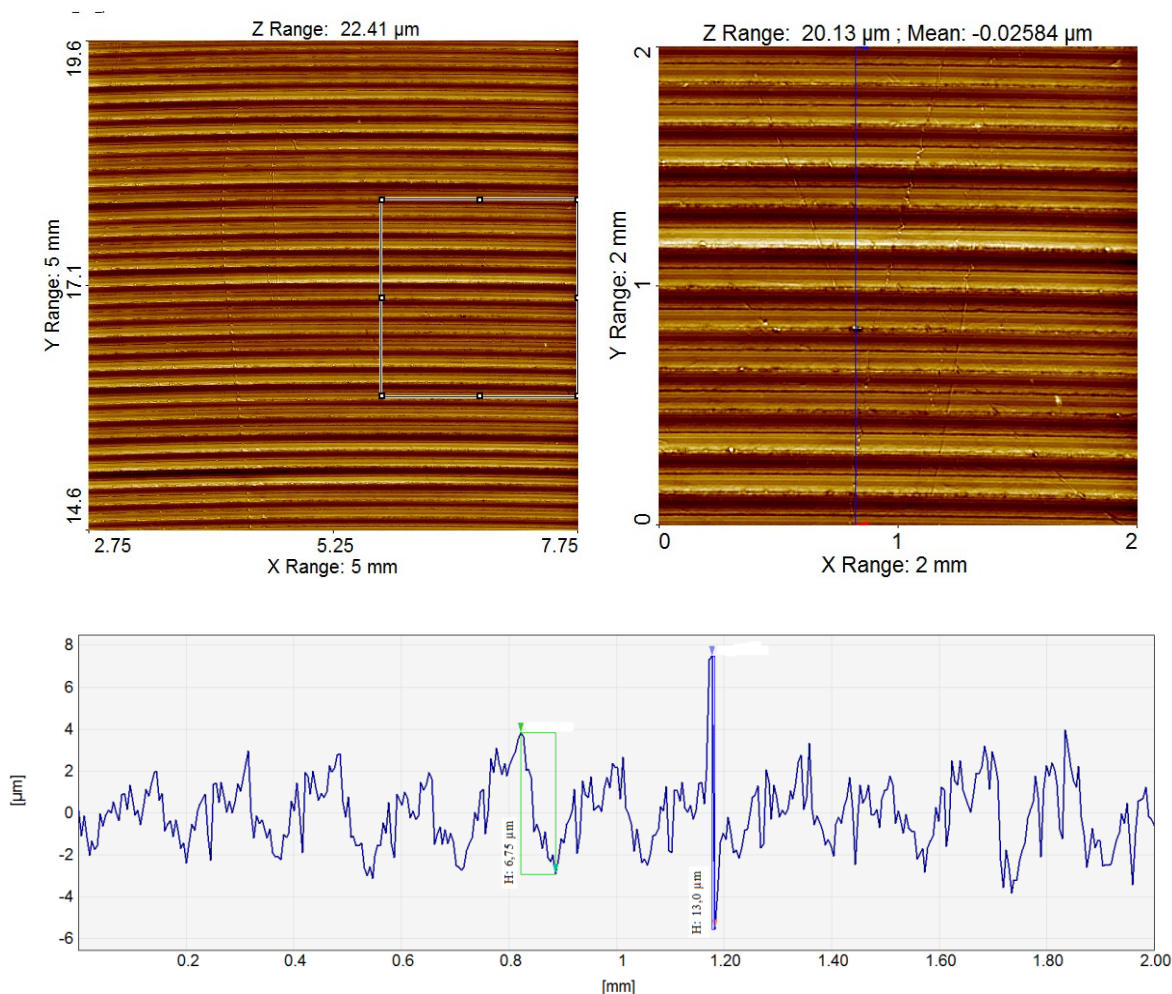
U vzorku P1 byl pro analýzu plošných parametrů použit L-filtr o velikosti 0,8 mm. Při analýze povrchu vzorků P2 a P3 byl použit L-filtru o velikosti 2,5 mm. Byly zapsány všechny analyzované plošné parametry a to S_a , S_z , S_p a S_v (viz Tab. 9), které jsou definovány podle normy ČSN EN ISO 25178-2. [18] Oblast měřené plochy byla o rozměrech 5x5 mm. Z měřeného vzorku byla odebrána 1 linie o svislé velikosti 2 mm, na které jdou nejlépe vidět nerovnosti vzniklé po dráze frézovacího nože, viz Obr. 21. Tyto nerovnosti mají za příčinu vyšší hodnoty plošných parametrů než u profilových.

Tab. 9 Parametry drsnosti plochy

	S_a [μm]	S_z [μm]	S_v [μm]	S_p [μm]
P1	1,2418	22,408	8,9678	13,441
P2	2,8713	30,694	11,4	19,295
P3	5,598	37,017	16,26	20,758

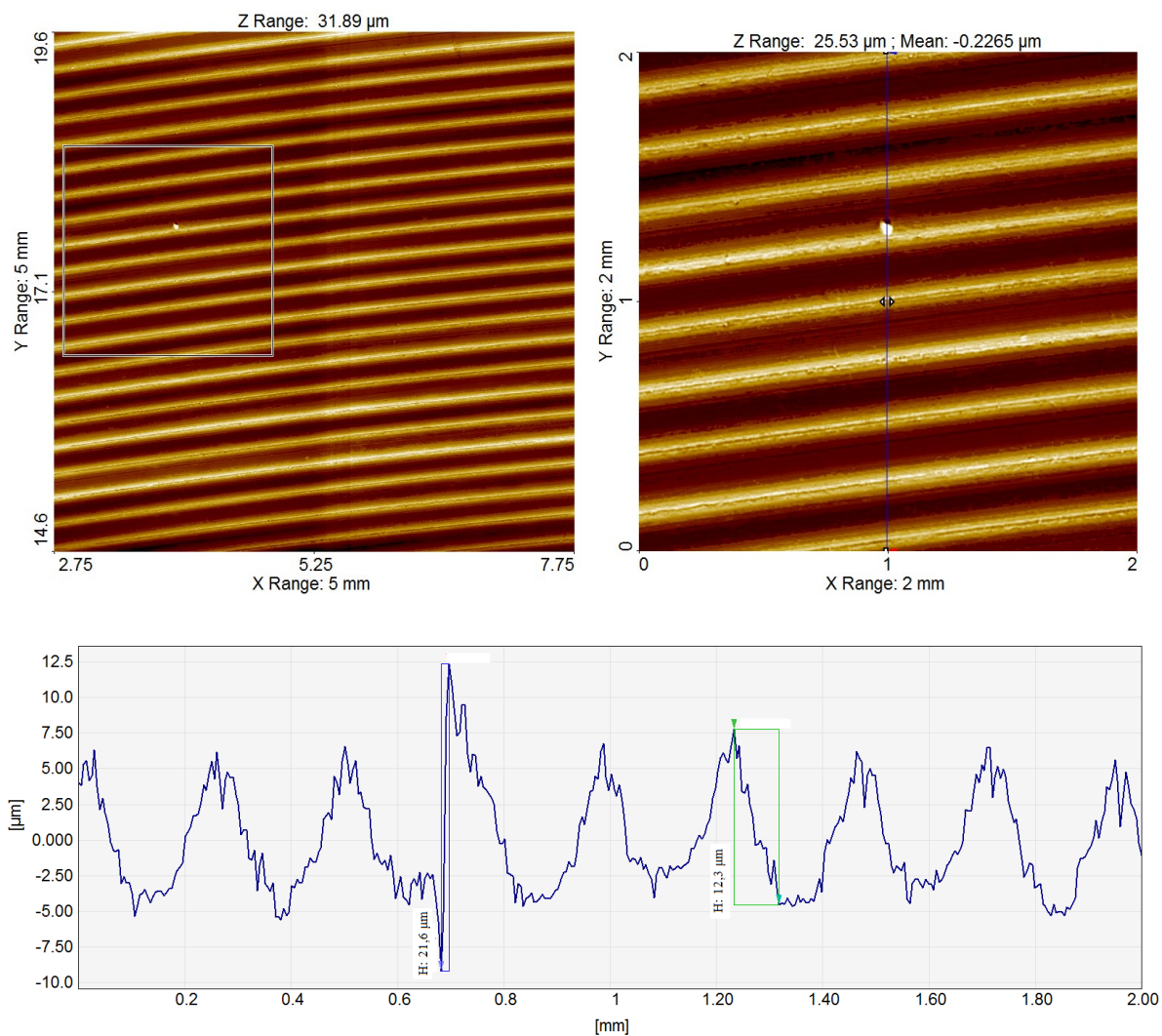


Obr. 21 Vybraná plocha vzorku P2



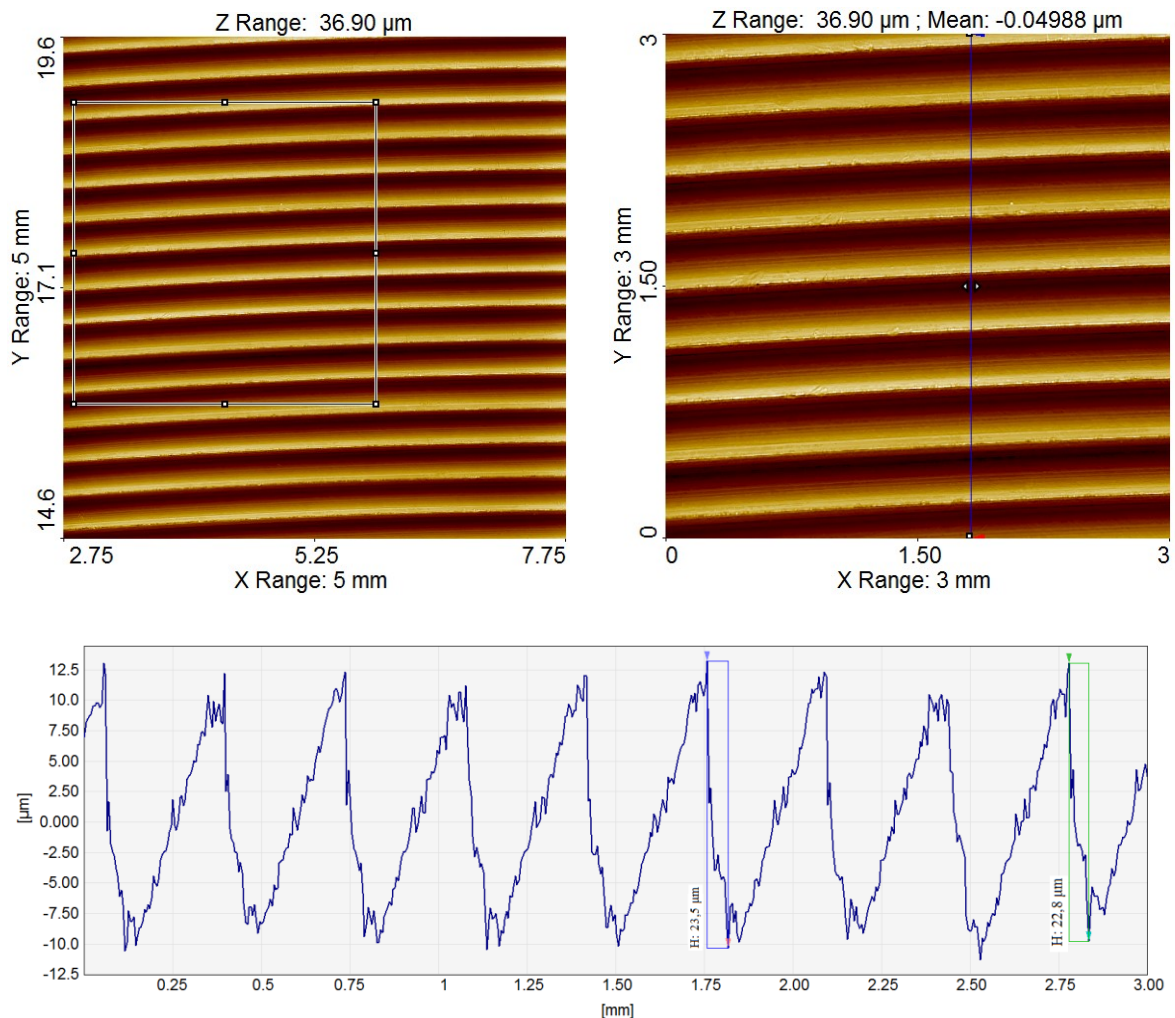
Obr. 22 Plocha povrchu P1 a jeho detail nerovností

Obr. 22 představuje vzorek P1 vybranou plochu vzorku o velikosti 2x2 mm. Při zvětšení jsou vidět rýhy a jiné nerovnosti, či nečistoty, které mohou ovlivnit měření. Byla zvolena jedna linie dlouhá 2 mm a je vedena přes trhlinu nebo nějakou nečistotu, která se neodstranila před měřením. Profil nám ukazuje velký výkyv v místě nečistoty a jeho hodnota R_z je 13,00 μm a pro srovnání jsem vybral i jinou hodnotu parametru R_z o hodnotě 6,75 μm. Všechny výkyvy a nerovnosti se projeví u naměřených hodnot.



Obr. 23 Plocha povrchu P2 a jeho detail nerovností

Na Obr. 23 je vzorek P2 a vybraný jeden detail o rozměru 2x2 mm. Na tomto povrchu jde vidět, že nemá kolik rýh a jiných nerovností jako předchozí vzorek P1, tudíž nečistoty neovlivňují moc měření. Ve zvětšeném detailu je vidět vybraná linie o velikosti 2 mm, která prochází přes jednu nečistotu. V profilu jsou vidět výkyvy, ale jen jedna se výrazně liší od ostatních a její hodnota R_z dosahuje 21,6 μm.



Obr. 24 Plocha povrchu P3 a jeho detail nerovností

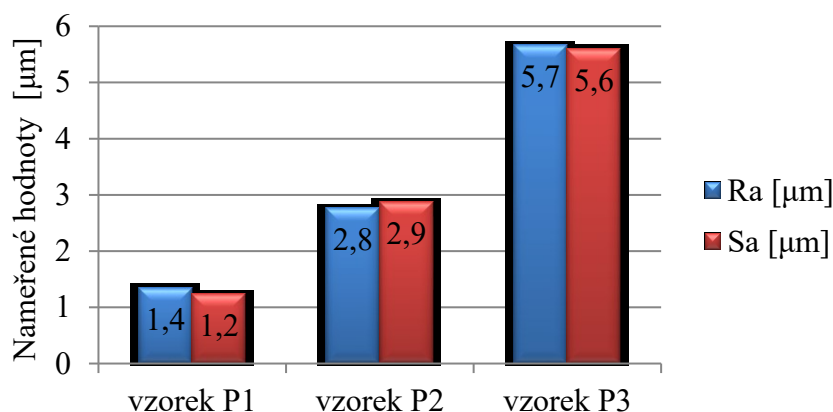
Poslední vzorek P3 je zobrazen na Obr. 24, na kterém jde vidět, že nejsou nijak znatelné rýhy a velké nečistoty, je tedy s porovnáním předchozích dvou vzorků nejpříznivější pro měření. Ve vybraném poli o velikosti 3x3 mm je zvolena jedna linie měřící 3 mm. Profil ukazuje jak je povrch rovný a dobře očištěn. Nejsou zde žádné velké skoky v hodnotách R_z . Pro srovnání jsou vybrány hodnoty parametru R_z : první 23,5 μm a následující o velikosti 22,8 μm. Výkyvy hodnot nejsou tak velké jako u předchozích vzorků, ale přesto se projeví v naměřených hodnotách.

Ze vzorku P1 bylo vybráno na povrchu plocha o rozměru 2x2 mm, který uváděla nejlépe nervnosti na povrchu viz příloha B a z něj odebrány dva vzorky o rozměru 400x400 μm zobrazující nečistotu a rýhu na vzorku. U druhé plochy ze vzorku P2 byla vybrána oblast o stejné velikosti jako u ploše P1 a z ní přiblížena část na 400x400 μm viz příloha C, která zobrazuje nalepenou nečistotu. U posledního vzorku P3 byla vybrána

plocha větší (3x3 mm) z důvodu drsnosti $Ra = 6,3 \mu\text{m}$ a nebyla by vhodně zobrazena struktura (viz příloha D) po přiblížení na velikost 400x400 μm .

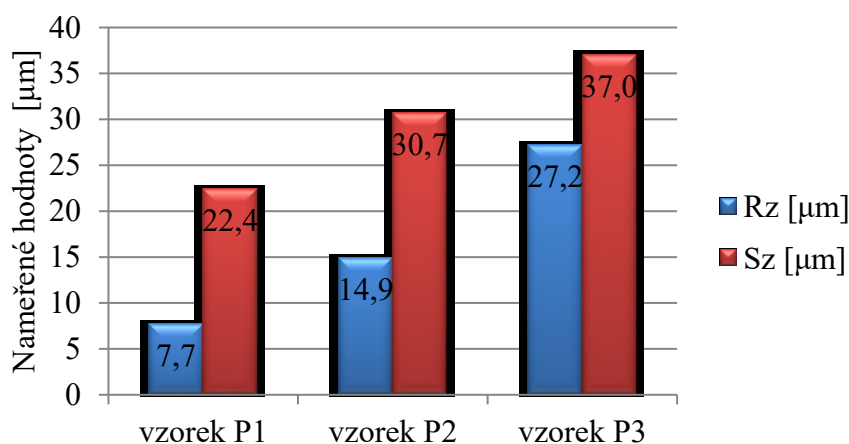
5.5 Porovnání profilových a plošných parametrů

Vzájemné porovnání vybraných profilových a plošných parametrů, jejichž hodnoty byly zjištěny při analýze zkoumaných vzorků P1 až P3 jsou graficky znázorněny na Obr. 25 až Obr. 28.



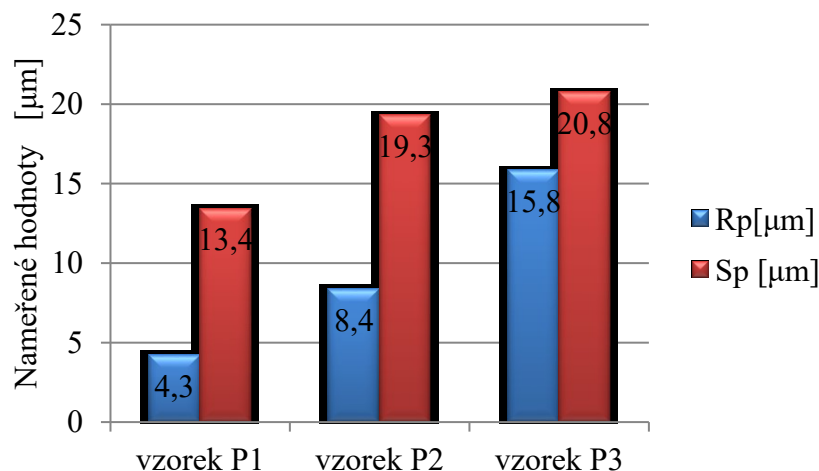
Obr. 25 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti Ra a plošného parametru Sa pro frézovaný povrch

Zvolené plošné parametry mají podobné použití jako profilové parametry. Na Obr. 25 vidíme, že hodnoty průměrovaných výškových parametrů Ra a Sa jsou stejné, jelikož tyto parametry nerozlišují vrchy od údolí, ale udávají průměrné hodnoty. Nicméně nelze tyto parametry brát za sobě rovné.



Obr. 26 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti Rz a plošného parametru Sz pro frézovaný povrch

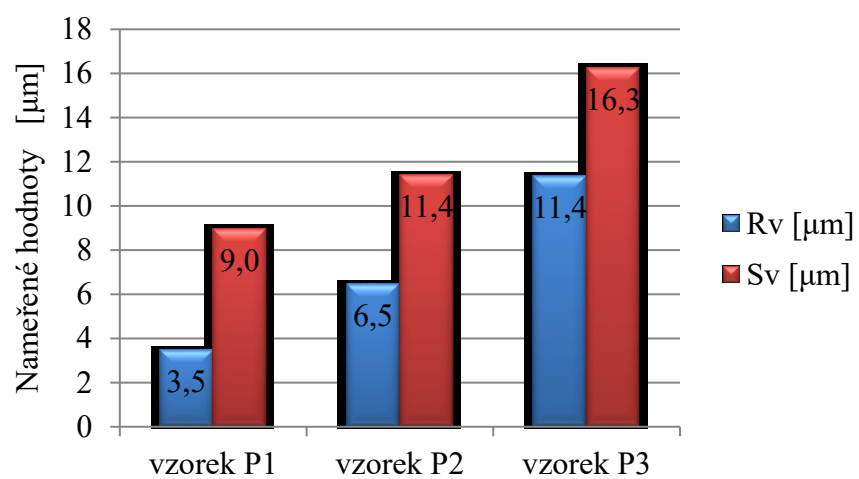
Plošná analýza na rozdíl od profilové dokáže změřit nejvyšší vrchol a nejhlubší dno textury povrchu. Při porovnání parametru R_z a S_z , viz Obr. 26 vidíme, že hodnoty plošných parametrů jsou u vzorku P1 až trojnásobné.



Obr. 27 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti R_p a plošného parametru S_p pro frézovaný povrch

Další parametry S_p a S_v značí hloubku prohlubně a největší výšku vrcholu. Pro profilové hodnocení je ekvivalentem parametr R_p a R_v . Tyto hodnoty vychází z bodových maximálních hodnot a ne z celkového povrchu, proto jsou naměřené hodnoty u těchto parametrů nižší, než u plošných parametrů. Na obrázku Obr. 27 a Obr. 28 je grafické porovnání zjištěných hodnot těchto parametrů. Plošné parametry zde dosahují dvojnásobných až trojnásobných hodnot oproti profilovým parametrům. Je to způsobeno tím, že hodnoty parametrů S_p a S_v specifikují absolutně nejvyšší a nejnižší body textury zkoumaného povrchu. Kdežto hodnoty parametrů R_p a R_v jsou analyzovány pouze z profilu zkoumaného vzorku, tudíž nelze zajistit, aby měřená linie zachytila nejhlubší a nejvyšší body studované topografie povrchu.

Plošné parametry textury jsou při hodnocení plochy stanovovány z daleko většího množství naměřených dat, které nám poskytují objektivnější prezentaci kontrolované plochy.



Obr. 28 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti R_v a plošného parametru S_v pro frézovaný povrch.

6 Závěr

Bakalářská práce se v úvodní části věnuje přehledu současného stavu měření drsnosti povrchu profilu a plochy. V teoretické části je popsána technologie frézování a její vliv na výslednou kvalitu povrchu. Dále se práce věnuje kontaktním a bezkontaktním metodám měření topografie povrchu, přičemž bezkontaktní metoda byla použita pro měření vzorků v experimentální části práce.

Následující kapitoly teoretické části bakalářské práce popisují vybrané profilové parametry povrchu dle normy ČSN EN ISO 4287 [1] a plošné parametry povrchu, které definuje norma ČSN EN ISO 25178-2 [2]. V současnosti je trendem využívat plošné parametry drsnosti získané měřením plochy, jelikož je tak možné získat objektivnější informace získané z celé plochy povrchu vzorku pro další analýzy.

Experimentální část bakalářské práce se věnuje popisu měření zkoumaných vzorků a vyhodnocení jejich povrchů pomocí profilových a plošných parametrů drsnosti, které jsou následně graficky porovnány na Obr. 25 až Obr. 28. Zde vidíme, že hodnoty průměrovaných výškových parametrů R_a a S_a jsou stejné. Ovšem hodnoty výškových plošných parametrů S_z , S_p a S_v jsou dvojnásobné až trojnásobné při porovnání s profilovými výškovými parametry R_z , R_p a R_v . Je to způsobeno tím, že profilové parametry zachytí pouze nejhlubší a nejvyšší body z profilu povrchu, kdežto plošná analýza na rozdíl od profilové dokáže změřit nejvyšší vrchol a nejhlubší dno textury povrchu.

Analýza povrchu pomocí plošných parametrů představuje významný kvalitativní pokrok v hodnocení zkoumané textury povrchu, jelikož nám poskytuje množství nových parametrů, které přesněji kvantifikují studovanou plochu a charakterizují funkční vlastnosti povrchu.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN EN ISO 4287 : *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [2] ČSN EN ISO 25178-2 : *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 52 s.
- [3] Pokrok v měření a hodnocení struktury povrchu. *časopis – MM průmyslové spektrum* [online]. Praha: <http://www.mmspektrum.com> . 2001 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
- [4] Company Profile. Zygo [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.zygo.com/?/aboutus/profile.htm>
- [5] Obchodní společnosti: IMECO TH s.r.o. *Nanotechnologie* [online]. 2009 [cit. 2017-05-10]. Dostupné: <http://www.nanotechnologie.cz/view.php?cislocclanku=2007080038>
- [6] *Technologie frézování: pracovní listy* [online]. Šumperk, 2007, 34 s. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.sszts.cz/stary_web/stary_web/esf/TEC_fr.pdf
- [7] HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ* – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [8] *Řezné podmínky při obrábění: technologie III - obrábění* [online]. Liberec, 2001, 1-6 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf
- [9] ČSN EN ISO 25178-6 *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 6: Klasifikace metod měření textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2010, 16 s.

- [10] PERNIKÁŘ, Jiří, Miroslav TYKAL a Josef VAČKÁŘ. *Jakost a metrologie: část: metrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.7
- [11] ČSN EN ISO 3274 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů. Praha: Český normalizační institut, 1999, 20 s.
- [12] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie. Část 1*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. 110 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [13] ČSN EN ISO 25178-602 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 602: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (konfokální chromatická sonda) . Praha: Český normalizační institut, 2011, 29 s.
- [14] DURAKBASA, M.N.; OSANNA, P.H.; DEMIRCIOGLU, P. *The factors affecting surface roughness measurements of the machined flat and spherical surface structures* – The geometry and the precision of the surface, Measurement, Volume 44, Issue 10, December 2011, Pages 1986-1999, ISSN 0263-2241, Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111002831>.
- [15] Non-contact Surface Roughness/Profile Measuring Instruments. *KEYENCE* [online]. 2014, , 1-5 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/equipment/non-contact-instruments.jsp>
- [16] Operating Manual FRT MicroProf®, © Fries Research & Technology GmbH, Friedrich Ebert Straße, Germany, version 1.214, manual dated 2009-03-18
- [17] Plakát. In *ÚCHYLKY TVARU A POLOHY DLE DIN ISO DRSNOST POVRCHU* [online]. Teplice : HOMMEL CS s.r.o., 2017 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>
- [18] ŠPERKA, P. Struktura povrchu vybraných strojních součástí [online prezentace]. 2009 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_tecnologii_obrabeni.pdf

- [19] ČSN ISO 16610-21 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace - Část 21: Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry. Praha: Český normalizační institut, 2012, 28 s.
- [20] KARRER, Jean-Marc. La mesure des états de surface. [online]. 2005, 24 s. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf>
- [21] Výškové parametry textury povrchu. *časopis - MM spektrum* [online]. Praha: www.mmspektrum.com, 2017 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>

8 Seznam obrázků

Obr. 1 3D profilometr LuphoScan 260 HD [5]	10
Obr. 2 Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [7].	13
Obr. 3 Geometrie břitu [6].	15
Obr. 4 Princip měření dotykovým profilometrem [12].....	17
Obr. 5 Optický profilometr MicroProf FRT [16]	20
Obr. 6 Skutečný profil povrchu [9]	22
Obr. 7 Geometrické parametry [17].....	23
Obr. 8 Obecný povrch a získání drsnosti z obecného povrchu. [18]	23
Obr. 9 Přenosová charakteristika profilových filtrů [1].....	24
Obr. 10 Složky textury povrchu [20]	25
Obr. 11 Znázornění parametru Ra [20].....	27
Obr. 12 Sledované výškové parametry [17]	27
Obr. 13 Parametr RSm [17]	28
Obr. 14 Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem, F-operací a S-F a S-L povrchy [2]	29
Obr. 15 Vybrané výškové parametry [21]	29
Obr. 16 Frézovací vzorkovnice.....	31
Obr. 17 Prostředí SPIP programu	32
Obr. 18 Profil drsnosti vzorku P1	35
Obr. 19 Profil drsnosti vzorku P2	35
Obr. 20 Profil drsnosti vzorku P3	36
Obr. 21 Vybraná plocha vzorku P2	36
Obr. 22 Plocha povrchu P1 a jeho detail nerovností.....	37
Obr. 23 Plocha povrchu P2 a jeho detail nerovností.....	38
Obr. 24 Plocha povrchu P3 a jeho detail nerovností.....	39
Obr. 25 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti Ra a plošného parametru Sa pro frézovaný povrch	40
Obr. 26 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti Rz a plošného parametru Sz pro frézovaný povrch	40
Obr. 27 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti Rp a plošného parametru Sp pro frézovaný povrch	41
Obr. 28 Grafické porovnání profilového parametru drsnosti Rv a plošného parametru Sv pro frézovaný povrch.	42

9 Seznam tabulek

Tab. 1 Způsoby obrábění a jejich drsnosti [8]	11
Tab. 2 Výškové parametry (výstupky a prohlubně) [1]	25
Tab. 3 Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic) [1]	26
Tab. 4 Délkové parametry [1]	26
Tab. 5 Parametry drsnosti vzorkovnice	32
Tab. 6 Profilové parametry drsnosti vzorku P1 – $R_a = 1,6 \mu\text{m}$	34
Tab. 7 Profilové parametry drsnosti vzorku P2 – $R_a = 3,2 \mu\text{m}$	34
Tab. 8 Profilové parametry drsnosti vzorku P2 – $R_a = 6,3 \mu\text{m}$	35
Tab. 9 Parametry drsnosti plochy	36

10 Seznam příloh

Příloha A – Technické parametry optického profilometru MicroProf FRT

Příloha B – Zobrazení povrchu P1 a jeho vady

Příloha C – Zobrazení povrchu P2 a jeho vady

Příloha D – Zobrazení povrchu P3